



Office de la propriété  
intellectuelle  
du Canada

Un organisme  
d'Industrie Canada

Canadian  
Intellectual Property  
Office

An Agency of  
Industry Canada

PCT/CA

0.3/1. 01488

30 OCTOBER 2003 30.10-03

*Bureau canadien  
des brevets  
Certification*

La présente atteste que les documents  
ci-joints, dont la liste figure ci-dessous,  
sont des copies authentiques des docu-  
ments déposés au Bureau des brevets.

*Canadian Patent  
Office  
Certification*

This is to certify that the documents  
attached hereto and identified below are  
true copies of the documents on file in  
the Patent Office.

Mémoire descriptif et dessins, de la demande de brevet no: 2,406,368, tels que déposés, le  
3 octobre 2002, par **HYDRO-QUÉBEC**, cessionnaire de Jacques Brochu, André Bergeron  
et René Cloutier, ayant pour titre: "Déglacage de Lignes de Transmission Électrique au  
Moyen d'un Déglaceur de Lignes Sous Charge".

**PRIORITY DOCUMENT**  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH  
RULE 17.1(a) OR (b)

REC'D 19 NOV 2003

WIPO

PCT

BEST AVAILABLE COPY

*Gracy Pauline*  
Agent certificateur/Certifying Officer

30 octobre 2003

Date

Canada

(CIPD 68)  
04-09-02

OPIC  CIPO

## **DÉGLAÇAGE DE LIGNES DE TRANSMISSION ÉLECTRIQUE AU MOYEN D'UN DÉGLACEUR DE LIGNES SOUS CHARGE**

La présente invention porte sur l'implantation d'un déglaceur de lignes sous charge (DLSC) à un poste cible d'un réseau de transport alternatif. Tel que présenté, l'appareil permet de procéder, par exemple, au déglacage préventif et correctif des conducteurs de lignes de transport à 230 et 315 kV.

Le DLSC impose une circulation de courant dans les circuits de lignes bouclées entre elles pour chauffer les conducteurs par effet Joule. Il peut être réalisé à l'aide de technologies classiques et éprouvées telles que transformateur-déphaseur (TD), condensateur et disjoncteur. Sa mise en service et son exploitation peuvent se faire en ne manoeuvrant que des disjoncteurs (aucun sectionneur), ce qui le rend insensible au verglas. On peut donc, par télécommande, raccorder successivement toutes les lignes d'une région cible au DLSC sans aucune interruption de charge. Les conducteurs des lignes les plus stratégiques peuvent être chauffés avant et pendant une tempête verglas pour prévenir la formation de glace.

La justification économique du DLSC à certains postes peut ne reposer que sur son utilisation comme déglaceur. Il faut toutefois souligner qu'il est possible que dans d'autres régions, sa capacité de commander les écoulements de puissance ou d'autres paramètres du réseau puisse être mise à profit tout au long de l'année.

Le terme DLSC est utilisé pour faire référence à la fonction de l'appareil plutôt qu'aux technologies employées pour le réaliser. Tout dépendant des lignes que l'on déglace, on montre que le DLSC d'un poste peut être constitué d'un TD seulement ou d'un TD en parallèle avec un condensateur. On dit que le TD est assisté lorsque utilisé conjointement avec un condensateur. Un TDA (transformateur-déphaseur assisté) se comporte comme un TD du point de vue du transit de la puissance active.

Outre le TD et le TDA, d'autres appareils peuvent être envisagés pour injecter une tension alternative en série avec des lignes à déglacer. Par exemple, un appareil de type FACTS (Flexible AC Transmission System) comme le SCCC (Static Synchronous Series Compensator) pourraient être considéré là où un réglage rapide des transits de puissance serait jugé utile. De plus, mentionnons que l'on peut étendre la technique de déglacage par circulation de courant à d'autres niveaux de tension que ceux rencontrés dans le cadre de notre étude.

## **1 Déglacage par circulation de courant**

### **1.1 Principe de fonctionnement**

Le principe de fonctionnement du déglacage par circulation de courant est illustré au moyen des trois exemples de la Fig. 1. On y montre l'effet d'un TD dans un réseau élémentaire constitué de deux lignes parallèles reliant une barre de génération à une barre d'équilibre. Pour fin de simplification, le TD est supposé ici idéal (sans impédance de fuite) et les lignes sont sans perte.

Dans le premier cas, le TD impose à ses bornes un décalage angulaire nul de sorte que la puissance de la source est transportée en parts égales par les deux lignes vers la barre d'équilibre.

Dans le second exemple, le décalage angulaire du TD est choisi de manière à réduire le courant de la ligne où il se trouve à zéro. On remarque en effet que le décalage angulaire du TD est égal à l'angle qui apparaît aux bornes des deux lignes; il n'y a donc plus d'écart angulaire aux bornes de la ligne en série avec le TD ce qui force le courant de celle-ci à zéro. Cet effet peut également être interprété comme étant dû à la circulation d'un courant de  $-0,5$  pu qui annule le courant de  $0,5$  pu dans la ligne où se trouve le TD et augmente le courant dans l'autre ligne à un peu plus de  $1,0$  pu.

On obtient donc une concentration de tout le courant de la charge dans une seule des deux lignes. Du point de vue de l'écoulement de la puissance active, cette situation est équivalente au retrait de la ligne où se trouve le TD. Du point de vue de la fiabilité d'exploitation, la concentration du courant de charge au moyen du TD est cependant meilleure puisque les deux lignes demeurent en service.

En troisième lieu, on montre finalement un exemple où on a choisi de forcer dans la ligne en série avec le TD un courant de  $1,02$  qui va de la barre infinie vers la barre de génération. On remarquera que ce courant est égal en amplitude mais de signe inversé au courant obtenu dans le second cas. Par rapport au cas initial, la ligne que l'on cherche à déglacer porte maintenant un courant quatre fois plus grand. C'est la circulation de ce courant élevé qui permet de chauffer et déglacer les conducteurs par effet Joule.

Ce dernier cas permet de souligner une particularité du déglacage par circulation de courant. En modifiant les angles du réseau, le TD agit directement sur les écoulements de puissance active. Le courant de circulation que l'on associe à l'effet du TD est donc un courant principalement actif plutôt que réactif. Dans le dernier cas, on notera effectivement que le courant de  $1,02$  pu qui circule dans la ligne en série avec le TD est un courant actif au même titre que le courant de  $1,02$  pu obtenu dans le second cas.

## 1.2 Transformateur-déphaseur

Les TD sont utilisés pour modifier les écoulements de puissance des lignes subissant des écarts angulaires anormaux à leurs bornes. Suivant les applications, ils sont utilisés en série avec les lignes de transport pour augmenter ("boost") ou réduire ("buck") la puissance transitée. On compte actuellement une centaine de TD en Amérique du Nord.

Il existe plusieurs topologies de TD tout dépendant du niveau de tension où l'on se trouve et des conditions d'exploitation envisagées à leurs bornes [1-3]. Un TD de type Mersereau est probablement le mieux approprié pour une installation à 315 kV comme celle envisagée ici. Un exemple de réalisation de la connexion Mersereau est illustré à la Fig. 2. Ce type de TD est constitué de deux noyaux (transformateurs) qui peuvent être physiquement logés dans la même cuve ou non. Le TD de type Mersereau peut être conçu pour agir indépendamment sur le décalage angulaire et sur l'amplitude des tensions à ses bornes. Dans le cas montré ici, le TD ne permet de modifier que l'écart angulaire.

Le principe de fonctionnement de ce TD est simple. Le transformateur shunt (d'excitation) est alimenté par un système de tensions triphasées prélevées au point milieu du transformateur série. Au secondaire du transformateur shunt on dispose d'un changeur de prise qui permet de varier la valeur des tensions que l'on applique au transformateur série. On remarquera que la tension au secondaire de la phase A du transformateur shunt n'est pas appliquée directement à la phase A du transformateur série. En effet, la phase A du transformateur série est plutôt alimentée par la différence des tensions apparaissant entre les phases C et B du transformateur shunt. Tel que montré sur le schéma de phaseurs, cette différence de tension  $V_{xc} - V_{xb}$  est en quadrature avec la tension  $V_{xa}$  au point milieu du transformateur série. En agissant sur le changeur de prise, on peut donc varier l'amplitude de la tension injectée et, du même coup, le décalage angulaire entre les tensions  $V_c$  et  $V_r$ .

On remarquera à la Fig. 2 que le transformateur shunt dispose d'un enroulement additionnel en série avec l'enroulement du changeur de prise. Cet enroulement permet de créer un décalage angulaire fixe qui s'ajoute ou se retranche à celui produit par l'enroulement du changeur de prise. On ajoute dans les TD ce type d'enroulement lorsque l'on veut atteindre des décalages angulaires relativement importants comme c'est le cas pour le déglacage des lignes. Pour fin de simplification, on a omis d'illustrer le schéma de détail du changeur de prise de même que des interrupteurs requis pour l'insertion et l'inversion de l'enroulement du changeur de prise et de l'enroulement additionnel.

La Fig. 3 présente en a) un schéma équivalent simplifié du TD valide pour la séquence directe. Tel qu'illustré, l'enroulement additionnel du transformateur shunt a été mis hors service. Pour fin de simplification, on a de plus représenté le transformateur série comme s'il était constitué de deux noyaux, plutôt qu'un seul. Suivant ces simplifications, on obtient les schémas équivalents b) et c) requis pour les études de répartition de puissance et de court-circuit. On remarquera ici que l'impédance de fuite du TD varie avec la position du changeur de prise. Les impédances  $Z_{sc}$  et  $Z_{sh}$  peuvent être calculées pour reproduire le

comportement du TD. Dans les bases de données des programmes de répartition de puissance, une table peut être spécifiée pour tenir compte de cette variation.

La Fig. 4 permet de clarifier la convention de signe employée ici pour l'angle interne  $\psi$  du TD. Elle est conforme avec la convention de signe employée dans le programme PSS/E.

### 1.3 Transformateur-déphaseur assisté

La technologie des régulateurs de puissance interphase (RPI) a donné naissance à trois appareils commercialisés par ABB: le lien découplant (LD), le transformateur limiteur de courant de défaut (TLCD) et le transformateur-déphaseur assisté (TDA) [4]. Un TDA est en service à un poste au poste Plattsburgh depuis juin 1998 [5].

Le TDA constitue un RPI réduit à sa plus simple expression. Tel que montré à la Fig. 5, il peut prendre deux formes suivant que le TDA est utilisé pour augmenter ("boost") ou réduire ("buck") la puissance transitée dans la ligne en série avec laquelle il se trouve. Pour l'accroissement du transit, on installe simplement un condensateur aux bornes d'un TD tandis qu'on utilise plutôt une inductance pour réduire le transit. Les axes de ce graphique correspondent à la puissance transitée par le TDA et à l'angle présent à ses bornes. Dans le cas présent, le TD est supposé idéal et l'angle  $\delta$  est égal à son angle interne  $\psi$ . Dans le cas d'un TD réel,  $\delta$  et  $\psi$  ne sont égaux l'un à l'autre que lorsque le courant est nul dans le TD. Ce système d'axes est appelé plan puissance-angle du régulateur de puissance.

Le TDA du poste Plattsburgh a été réalisé en ajoutant une inductance en parallèle avec un TDA existant. Pour le cas du déglacage par circulation de courant, on aura plutôt recouru à l'installation d'un condensateur en parallèle avec un TD. Le schéma unifilaire du TDA au poste cible est montré à la Fig. 6.

Soulignons que pour les deux types de TDA, le comportement du TD est relativement peu affecté par la mise en parallèle de l'élément réactif parce que l'impédance de cet élément est beaucoup plus grande que celle de l'impédance de fuite du TD, d'où le terme transformateur-déphaseur assisté. L'élément réactif sert en fait à augmenter le niveau de transit dans la ligne à un niveau plus élevé que ne le permet le TD utilisé seul.

La Fig. 7 illustre schématiquement de quelle manière le condensateur vient assister le TD dans son travail de régulateur de puissance. Dans un premier temps, on montre qu'après ajustement du changeur de prise du TD, le niveau de transit dans la ligne a pu être augmenté à un certain niveau. Tel que mentionné précédemment, une tension doit être injectée par le TD pour produire le décalage angulaire à ses bornes. Dans le cas de l'accroissement de la puissance, la tension injectée est telle que si on raccorde un condensateur en parallèle avec le TD une partie du courant de la ligne se trouve à être détournée par le condensateur. Les études de répartition de puissance montrent qu'alors le

transit dans la ligne varie peu tandis qu'il baisse beaucoup dans le TD ce qui lui permet de chauffer moins.

Il devient alors possible de réajuster le changeur de prise du TD pour augmenter à nouveau son courant à sa valeur nominale. Ce faisant, le courant augmente aussi dans le condensateur ce qui concourt à augmenter la puissance transitée par la ligne.

On obtient une situation tout à fait similaire dans le cas où l'on raccorde une inductance en parallèle avec un TD. Ainsi, avec un TD d'une puissance nominale donnée, la conversion en TDA permet d'augmenter le transit dans la ligne au-delà de la limite thermique du TD. Dans une application qui requiert un TD ayant une large plage angulaire, comme c'est le cas pour le déglacage de lignes longues, il est donc possible de spécifier un TD beaucoup plus petit s'il est assisté par un élément réactif que s'il est utilisé seul. Les figures présentées à la section suivante illustrent ceci.

Soulignons que le TDA avec condensateur présente une particularité de première importance pour le déglacage. Plus la tension injectée augmente, plus la puissance réactive du condensateur soumis à cette tension augmente. La production de puissance réactive par le condensateur se trouve donc à augmenter dans le même sens que les besoins en puissance réactive du réseau. En condition de déglacage, les puissances transitées par les lignes dépassent très largement leur niveau habituel ce qui conduit normalement à des effondrements de tension dans le réseau. Le TDA, par sa production de puissance réactive, permet d'éviter ces effondrements de tension et le réseau peut maintenir des tensions adéquates pour l'alimentation des charges durant le déglacage.

## **2 Conception et exploitation du DLSC**

Si on devait déglacer les lignes en n'utilisant que la technologie des TD, la question du dimensionnement de ce dernier serait relativement simple. Il faudrait alors effectuer un ensemble de calcul de répartition de puissance de manière à identifier les conditions d'exploitation les plus stressantes. Dans le cas du TDA, toutefois, la question du dimensionnement devient plus complexe puisque l'on dispose d'un degré de liberté additionnel; le choix de l'impédance du condensateur.

On peut relever quatre facteurs qui interviennent dans le choix de cette impédance:

- le coût du TDA (lorsque la puissance nominale du condensateur augmente celle du TD diminue et vice versa);
- l'impédance de la boucle de déglacage;
- la fréquence du mode de résonance introduit par le condensateur du TDA;

- le support de tension au réseau en situation de déglacement.

Outre le dimensionnement, nous apportons aussi dans les sections qui suivent quelques points d'information quant à l'exploitation du DLSC.

## 2.1 Méthode $P-\delta_{sr}$

La méthode d'analyse des régulateurs de puissance (TD, TDA, UPFC ou autres) dans le plan Puissance ( $P$ ) - Angle ( $\delta_{sr}$ ) a été mise au point au CITEQ [4-7]. Elle permet d'exprimer très simplement l'interaction d'un régulateur de puissance avec le réseau où il se trouve. Nous l'utilisons ici pour illustrer graphiquement le fonctionnement du DLSC. Les quelques lignes qui suivent résument les principaux aspects de cette méthode.

Telle que montrée à la Fig. 8, la méthode  $P - \delta_{sr}$  permet de considérer le réseau dans son ensemble, quelle que soit sa complexité. L'analyse du comportement combiné du réseau avec son régulateur de puissance, ici un TD, est faite en observant la puissance transitée  $P$  par le régulateur en fonction de l'écart angulaire  $\delta_{sr}$  à ses bornes. Ces deux grandeurs sont utilisées pour définir le plan  $P - \delta_{sr}$ .

On peut définir dans le plan  $P - \delta_{sr}$  deux types de caractéristiques relativement linéaires et bien découplées l'une de l'autre:

- la caractéristique du réseau dépend relativement peu du type de régulateur de puissance (elle est principalement fonction des impédances du réseau et de son mode d'exploitation);
- la caractéristique du régulateur dépend relativement peu du réseau (elle est principalement fonction des paramètres du régulateur).

Le point d'intersection de ces deux caractéristiques donne le point de fonctionnement de l'ensemble réseau-régulateur de puissance. Pour un réseau donné, on peut donc illustrer très simplement les effets que l'on obtiendra sur le dimensionnement du régulateur si on modifie l'un ou l'autre des paramètres du réseau ou du régulateur.

Un exemple de modification de paramètre du TD est justement présenté à la Fig. 9. On montre ici de quelle manière la caractéristique du TD est modifiée par la mise en parallèle d'un condensateur pour constituer un TDA. Puisque le condensateur est en parallèle, la puissance qu'il transporte peut être directement additionnée à celle du TD pour obtenir la caractéristique du TDA tracée en trait gras. On a illustré cette addition des caractéristiques pour deux angles internes  $\psi$  différents. En prévision de ce qui suit, mentionnons que plus l'impédance du condensateur est petite, plus sa caractéristique aura une pente négative.

## 2.2 Mise en service du DLSC

La mise en service du DLSC peut être faite suivant l'une des deux méthodes illustrées à la Fig. 10. Encore ici, on prend comme exemple le TD.

Suivant la première méthode, juste avant la mise en service du TD, le réseau est configuré de manière à créer une concentration du courant de charge sur une des lignes à déglacer. Cette concentration de charge est faite uniquement en manoeuvrant les disjoncteurs du réseau. Par la suite, l'angle interne  $\psi$  du TD est pré-ajusté à la même valeur que l'angle  $\delta_{sr}$  mesuré à ses bornes. De cette manière, à la fermeture du disjoncteur du TD, l'impact du TD sur les transits du réseau est minimal; la valeur de  $P_{TD}$  reste faible, voisine de zéro.

Dans le cas où la ligne laissée momentanément en antenne est longue, cette méthode présente l'inconvénient de produire une surtension sur cette dernière en raison de l'effet Ferranti. Cette difficulté est contournée avec la seconde méthode. Alors que les deux barres du TD sont court-circuitées par les disjoncteurs du réseau, on ajuste l'angle interne  $\psi$  à zéro degré puis on met le TD en service. L'angle  $\delta_{sr}$  aux bornes du TD est alors nul. Par la suite, on configure le réseau en prévision de concentrer le courant de charge comme précédemment. Finalement, on ouvre le disjoncteur qui court-circuite le TD. De cette manière, les lignes à déglacer ne se retrouvent jamais en antenne. Par contre, tout dépendant des conditions d'exploitation, le réajustement des transits au moment de l'insertion du TD peut être plus important qu'avec la première méthode.

La Fig. 11 montre la différence entre ces deux méthodes dans le plan  $P - \delta_{sr}$ . Les points de fonctionnement illustrés correspondent à l'état du réseau et du DLSC en mode TDA après sa mise en service. Bien que ce schéma soit qualitatif, il représente un calque assez fidèle des résultats obtenus lors de simulations de la mise en service du DLSC pour un déglacement de lignes à 315 kV.

Une fois le DLSC en service, il ne reste plus qu'à varier le changeur de prise du TD pour varier la tension injectée et, par conséquent, l'angle interne  $\psi$ . Dans le plan  $P - \delta_{sr}$ , cette variation de l'angle interne se traduit par le glissement latéral de la caractéristique du DLSC (TD ou TDA). Ce faisant, le point d'intersection de la caractéristique du DLSC et de la caractéristique du réseau glissera le long de la caractéristique de réseau. C'est en faisant glisser la caractéristique du régulateur vers la droite que l'on passe des conditions de fonctionnement montrées à la Fig. 11 à celles de la Fig. 12 en condition de déglacement.

Fait important à souligner, le DLSC étant raccordé à un jeu de barres, il est possible de l'utiliser pour déglacer les lignes situées à proximité du poste de même que certaines lignes situées loin du poste. On a alors recourt à des manoeuvres de disjoncteurs pour raccorder aux bornes du DLSC les divers circuits de lignes en forme de boucle. Dans certains cas, des manoeuvres de disjoncteurs sont donc également requises dans des postes éloignés pour déglacer des lignes qui ne sont pas directement raccordées au poste où se trouve le DLSC.



### **2.3 Puissances nominales du condensateur et du TD**

À l'aide du plan  $P - \delta_{sr}$ , on peut maintenant présenter le compromis que nous avons fait en dimensionnant le condensateur et le TD du TDA. La Fig. 12 donne les conditions de déglacement des lignes à 315 kV raccordées au poste cible. Sur chacun de ces graphiques, on retrouve les caractéristiques du réseau du condensateur et du TDA. Les flèches montrent qualitativement les niveaux des puissances actives portées par le condensateur, le TD et le TDA. Tel que mentionné plus haut, la somme de la puissance du condensateur et du TD donne celle du TDA. Tout comme à la Fig. 11, ce schéma représente assez fidèlement les résultats obtenus par simulation.

En comparant le déglacement des lignes 3082 et 3083 avec celui des lignes 3089 et 3090, on remarque que, dans le premier cas, la puissance transitée par le condensateur est à peu près égale à celle du TD. Dans le second cas, cependant, la puissance portée par le condensateur est près du double de celle du TD. De toutes les conditions de déglacement étudiées, c'est dans le premier cas que la puissance transitée par le TD est la plus grande tandis que c'est dans le second cas que la puissance transitée par le condensateur est la plus grande.

Il est important de souligner au passage à quel point le TDA est bien adapté au déglacement des lignes de transport. En effet, les deux cas de la Fig. 12 montrent que la puissance nominale du TD requise pour commander le courant de déglacement est de l'ordre de la moitié de la puissance nominale d'un TD équivalent pouvant produire seul, sans le condensateur, le même courant de déglacement.

Afin de réduire le coût du TD, il est possible de réduire la valeur de l'impédance du condensateur de manière à ce que le transit de ce dernier soit le plus élevé possible et, qu'inversement, le transit du TD soit le plus faible possible. Ce faisant, on force à la hausse la taille et le coût du condensateur. La question ici est donc de savoir quelle est l'impédance de condensateur qui permet d'obtenir globalement un TDA dont le coût est minimal et ce, en tenant compte de toutes les conditions de déglacement désirées.

Idéalement, une certaine collaboration doit être mise en place entre le manufacturier du TDA et le planificateur du réseau pour dimensionner un TDA au meilleur coût.

### **2.4 Déglacement en mode TD vs TDA**

On peut montrer que la pente de la caractéristique du réseau dépend de la somme des impédances des éléments de la boucle de déglacement; la pente est inversement proportionnelle à cette somme.

Dans le cas du réseau d'une région où l'on cherche à déglacer aussi bien des lignes à 230 kV qu'à 315 kV, ceci implique que la pente de la caractéristique du réseau va varier considérablement tout dépendant des lignes à déglacer. La pente de la caractéristique du réseau sera la plus forte dans le cas où on déglace les lignes à 315 kV. Elle baissera considérablement dans le cas des lignes à 230 kV. On peut apprécier la variation de la pente de la caractéristique réseau en comparant la Fig. 12 et la Fig. 13 tracées toutes les deux à la même échelle. La baisse marquée de la caractéristique du réseau à 230 kV s'explique par la construction mécanique des lignes (structure et longueur) et aussi par la présence au poste de deux transformateurs 315/230 kV en série dans la boucle.

Cette baisse de la pente de la caractéristique du réseau a un impact sur le choix du mode de déglacage. Les études que nous avons faites nous ont amené à n'utiliser le mode TDA que pour les lignes à 315 kV et le mode TD que pour les lignes à 230 kV.

On a procédé à la conception du DLSC en considérant en premier lieu les lignes à 315 kV parce que celles-ci exigent des niveaux de courants nettement plus élevés qu'à 230 kV. Le choix de l'impédance du condensateur a été fait pour ces lignes tel que décrit plus haut. Par la suite, lorsqu'on a procédé aux études de déglacage des lignes à 230 kV, on a réalisé que le TD requis à 315 kV présente une puissance nominale suffisante pour être exploité seul lors du déglacage des lignes à 230 kV.

Cette situation a grandement facilité la conception du DLSC en limitant de beaucoup le nombre de cas à considérer pour le choix du condensateur.

En fait, à la Fig. 13, les deux exemples de déglacage des lignes 2387 et 2388 montrent que, pour exploiter le DLSC en mode TDA à 230 kV, il aurait probablement fallu varier l'impédance du condensateur suivant le niveau de tension des lignes à déglacer. Dans le premier cas, le DLSC se résume à son TD et le déglacage des lignes est possible avec une puissance  $P_{TD}$  relativement faible. Dans le second cas, le DLSC est en mode TDA avec le même condensateur que celui retenu pour le déglacage à 315 kV. On peut voir que le TDA produit dans le réseau un transit identique au cas précédent ( $P_{TD} = P_{TDA}$ ). Cependant, le TD est maintenant le siège d'un transit beaucoup plus élevé que dans le premier cas. Il y a donc un courant de circulation important entre le TD et le condensateur. De fait, une fraction seulement du courant du condensateur quitte le TDA, la majeure partie du courant boucle dans le TDA en passant par le TD.

En ne réservant le condensateur que pour le déglacage des lignes à 315 kV, on évite de compliquer inutilement l'exploitation et la conception du DLSC. Ailleurs qu'au poste considéré ci-dessus, on pourrait être amené à utiliser deux ou plusieurs condensateurs d'impédances différentes pour faciliter l'adaptation du TDA aux impédances des diverses boucles à déglacer. On pourrait alors avoir recourt à des sectionneurs pour choisir différents condensateurs ou différentes combinaisons de condensateurs.

## 2.5 Résonance super synchrone

Le condensateur du TDA n'introduit pas de mode sous synchrone comme la compensation série classique parce que son impédance est trop élevée pour cela. Typiquement, ce mode de résonance est super synchrone.

Le condensateur du TDA présente une réactance de  $159 \Omega$ . Il introduit un mode de résonance dont la fréquence sera différente suivant que le TDA est sur le point d'être mis en service ou qu'il est en service.

Lorsque le TDA est sur le point d'être mis en service, en procédant suivant la première méthode décrite plus haut ( $P_{TDA} = 0$ ), le condensateur est en parallèle avec l'impédance de fuite du TD uniquement. En supposant que la valeur maximale de cette impédance de fuite varie entre 5 et 10% sur la base du TD (de  $\psi$  min à  $\psi$  max), on a obtenu une impédance pouvant varier entre  $11,51$  à  $23,02 \Omega$  lorsque l'angle interne est nul ou maximum. Dans ces conditions, la fréquence de résonance varie entre 223 et 158 Hz respectivement. Mentionnons que même avec une impédance de fuite variant entre 10 et 20%, la fréquence de résonance ne baisserait pas en bas de 111 Hz.

Il faut veiller à maintenir cette fréquence de résonance suffisamment élevée si on désire mettre le TDA en service suivant la première méthode. Avec les paramètres que nous avons employés, les calculs de répartition de puissance montrent que l'angle interne  $\psi$  du TD peut être varié entre  $\pm 30^\circ$  sans que le courant qui circule alors entre le TD et son condensateur ne dépasse le courant nominal du TD. Ceci convient bien aux conditions d'exploitation étudiées ici. Juste avant la mise en service du TDA pour le déglacage des lignes 3082 et 3083, l'angle interne  $\psi$  est ajusté à  $7,6^\circ$  ce qui est très en dessous de la limite de  $30^\circ$ .

Le fait que l'on puisse raccorder le condensateur en parallèle avec le TD alors que l'angle interne atteint  $\pm 30^\circ$  indique que la fréquence de résonance du TDA est suffisamment élevée pour éviter l'apparition de surtension à 60 Hz. À  $15$  et  $30^\circ$ , on a relevé des tensions phase-terre aux bornes du condensateur inférieures à 1,07 et 1,15 pu respectivement. Ce TDA n'a donc pas besoin de protection particulière à ce niveau.

Lorsque le TDA est en service, la présence des inductances des lignes de transport concourt à élever la fréquence de résonance du mode introduit par le condensateur, ce qui améliore encore un peu plus la situation.

Mentionnons finalement que d'autres conditions d'exploitation peuvent avoir un impact sur le choix du condensateur. À titre d'exemple, si le TDA déglace une ligne alors que son angle interne est près de sa valeur maximale et que la boucle vient à s'ouvrir pour une raison ou une autre, des surtensions importantes peuvent apparaître aux bornes du TDA et ailleurs dans le réseau tout dépendant de la topologie de ce dernier. S'il y a lieu, le choix

du condensateur pourra être revu ou des éléments de protection tels que des parafoudres pourront être envisagés pour assurer l'intégrité du réseau.

### 3 Description du DLSC au poste cible

Le DLSC au poste cible est principalement composé de quatre parties:

- un transformateur-déphaseur;
- un banc de condensateur;
- deux disjoncteurs;
- deux sectionneurs motorisés.

Les caractéristiques électriques de cette section sont spécifiques au poste cible et sont données à titre indicatif.

#### Transformateur-déphaseur

Le Tableau 1 donne les puissances  $S_r$  en fonction des angles internes et externes du TD. Dans le cadre de la présente étude, on a utilisé une impédance série de 10% évaluée sur la base de la puissance nominale du TD. Celle-ci avait été initialement évaluée à 430 MVA.

Tableau 1 Caractéristique puissance-angle du TD

	Angle interne $\psi$ (degrés)	Angle externe $\delta_{sr}$ (degrés)	Puissance $S_r$ du TD (MVA)	Puissance $S_r$ du TDA (MVA)
TD seul	60	60,9	142	n. a.
	50	48,8	153	
	-32	-30,5	186	
	60	57,0	251	
	30	27,5	272	
TD en mode assisté	53	49,8	266	812
	43	37,9	443	842

La puissance maximale du TD est de 443 MVA lorsque l'angle interne vaut 43°. La puissance du TD n'atteint cependant que 251 MVA lorsque l'angle interne vaut 60°. L'angle interne peut varier de -60° à 60° suivant les conditions de déglacage.

À la lumière de ces résultats on a spécifié comme suit les principales caractéristiques du TD:

- 450 MVA à une température ambiante de 0 °C et un angle interne de 45°;

- 250 MVA à une température ambiante de 0 °C et un angle interne de 60°;
- tension phase-phase nominale de 315 kV;
- impédance série approximative de 10% à la prise maximale;
- 3 plages angulaires: -60° à 0°, -30° à 30° et 0° à 60°;
- le changeur de prise sous charge doit permettre de couvrir chacune des plages sans interruption;
- 4 degrés maximum par prise;
- 4000 MVA de puissance de court-circuit au poste cible.

Au-delà de 45 degrés, il n'est pas nécessaire que la capacité du TD soit maintenue à sa valeur maximale de 450 MVA. On s'attend à ce que cette particularité ci soit prise en compte afin de réduire le coût du TD.

Pour réduire le coût du TD, l'impédance série à la prise maximale peut être différente de 10%. Si la valeur de cette impédance doit être augmentée, la plage de variation de l'angle interne devrait être modifiée de manière à ce que les angles externes de 60,9° et 37,9°, relevés au Tableau 1, soient approximativement maintenus lorsque les puissances font respectivement 142 et 443 MVA. Dans le premier cas, ceci nous assure qu'à la prise maximale le TD (utilisé seul) permet d'imposer le courant de déglacage requis. Dans le second cas, ceci nous assure que la tension aux bornes du condensateur du DLSC respectera la valeur maximale que nous avons retenue (voir plus bas).

**Le TD peut être conçu avec un ou deux noyaux suivant l'option la plus économique.**

La puissance nominale du TD est spécifiée à une température ambiante de 0 °C parce qu'il n'est pas prévu que cet appareil soit utilisé en dehors des périodes de verglas. En temps normal, l'appareil est sous tension, raccordé au réseau par un seul de ses deux côtés. Il ne sera complètement mis en service que quelques jours par an. Les pertes fer devraient donc être minimisées alors que les pertes cuivre ne sont pas importantes. Le mode de refroidissement du TD (ONAN, ONAF ou OFAF) devrait être choisi de manière à minimiser le coût de l'appareil.

À titre indicatif, on estime actuellement que le cycle de charge le plus sévère pourrait ressembler à ceci:

- niveau de charge initial de 0 MVA;
- 24 heures à demi-puissance lorsque mis en réseau en prévision d'une tempête de verglas;
- 10 heures à 450 MVA durant la phase initiale de la tempête;
- variations cycliques de la charge entre 270 et 450 MVA à toutes les 2,5 heures tant que dure la tempête.

Durant une tempête de verglas, le changeur de prise peut être amené à fonctionner sur toute sa plage (prise minimum à prise maximum) deux à quatre fois par période de 2,5 heures. Le restant de l'année, il demeurera normalement à la prise offrant un déphasage interne nul.

Le nombre de degrés par prise doit être choisi afin de réduire le coût du TD sans toutefois dépasser quatre degrés par prise.

Le TD doit être muni des équipements de mesure et de protection appropriés.

### ***Condensateur du DLSC***

Les principales caractéristiques du condensateur du DLSC sont les suivantes:

- 465 Mvar au total (3 x 155 Mvar) à une température ambiante de 0 °C;
- tension nominale de 157 kV;
- réactance de 159  $\Omega$ ;
- isolation phase-terre nominale des deux bornes des condensateurs de 182 kV.

Les condensateurs du DLSC ne sont mis en service que pour des déphasages internes ne dépassant pas 53 °. En tenant compte de l'impédance série du TD, on a relevé une tension maximale d'exploitation de 157 kV.

La réactance et la tension des condensateurs du DLSC sont beaucoup plus élevées que ce que l'on retrouve habituellement pour la compensation série. Suivant la norme IEEE STD. 18-1992, les condensateurs spécifiés ici sont en mesure de porter la tension phase-terre nominale de 182 kV pendant près de 30 minutes. Lors d'un défaut phase-terre dans le réseau, le système de protection aura donc tout le temps voulu, et même plus, pour éliminer le défaut sans stresser les condensateurs. Des éclateurs commandés ne sont donc pas requis au poste cible pour protéger les condensateurs. De plus, les parafoudres ne devraient être dimensionnés que pour protéger les condensateurs des chocs de foudre.

Le condensateur doit être muni des équipements de mesure et de protection appropriés.

### ***Disjoncteurs***

Ils doivent tenir 330 kV, 2000 A et présenter un pouvoir de coupure de 31,5 kA symétrique.

### ***Sectionneurs motorisés***

Ils doivent tenir 315 kV et 2000 A.

#### **4 Description des condensateurs shunts d'un poste autre que le poste cible**

Des bancs de condensateur shunts peuvent être requis à certains postes pour supporter les tensions adéquatement durant le déglacage de certaines lignes. Dans le cas présent, un poste, autre que le poste cible, doit recevoir deux condensateurs shunts.

Les principales caractéristiques de chacun des bancs de condensateurs shunts sont les suivantes:

- 50 Mvar au total (3 x 16,67 Mvar) à une température ambiante de 0 °C et à la tension nominale;
- tension phase-phase nominale de 161 kV (92,95 kV phase-terre);
- tension phase-phase maximale de 177,1 kV (102,2 kV phase-terre).

Chacun des bancs de condensateurs doit être équipé d'un disjoncteur et des équipements de mesure et de protection appropriés.

#### **5 Références**

- [1] IEEE FACTS WG, "Current activity in flexible AC transmission systems", IEEE, No. 92 TH 0465-5 PWR, avril 1992.
- [2] Krämer A. et Ruff J., "Transformers for phase angle regulation considering selection of on-load tap changers", IEEE /PES, no PE-070-PWRD-1-05-1997, 1997.
- [3] Seitlinger W., "Phase shifting transformers - Discussion of specific characteristics", CIGRÉ, no 12-306, 1998.
- [4] Brochu J., "Interphase power controllers", Polytechnic International Press, Montréal, 2e édition, janvier 2001.
- [5] Lemay J., Bérubé P., Brault M. M., Gvozdanovic M., Henderson M. I., Graham M. R., Smith G. E., Hinners R. F., Kirby L. R., Beauregard F. et Brochu J., "The Plattsburgh interphase power controller", IEEE 1999 T&D Conference and Exposition, New Orleans, avril 1999.
- [6] Brochu J., Beauregard F., Lemay J., Morin G., Pelletier P. et Thallam R. S., "Application of the interphase power controller technology for transmission line power flow control", IEEE Transactions PWRD, vol. 12, no. 2, avril 1997, pp 888-894.

- [7] Brochu J., Beauregard F., Lemay J., Pelletier P. et Marceau R. J., "Steady-state analysis of power flow controllers using the power controller plane", IEEE Transactions PWRD vol. 14, no 3, juillet 1999, pp. 1024-1031.



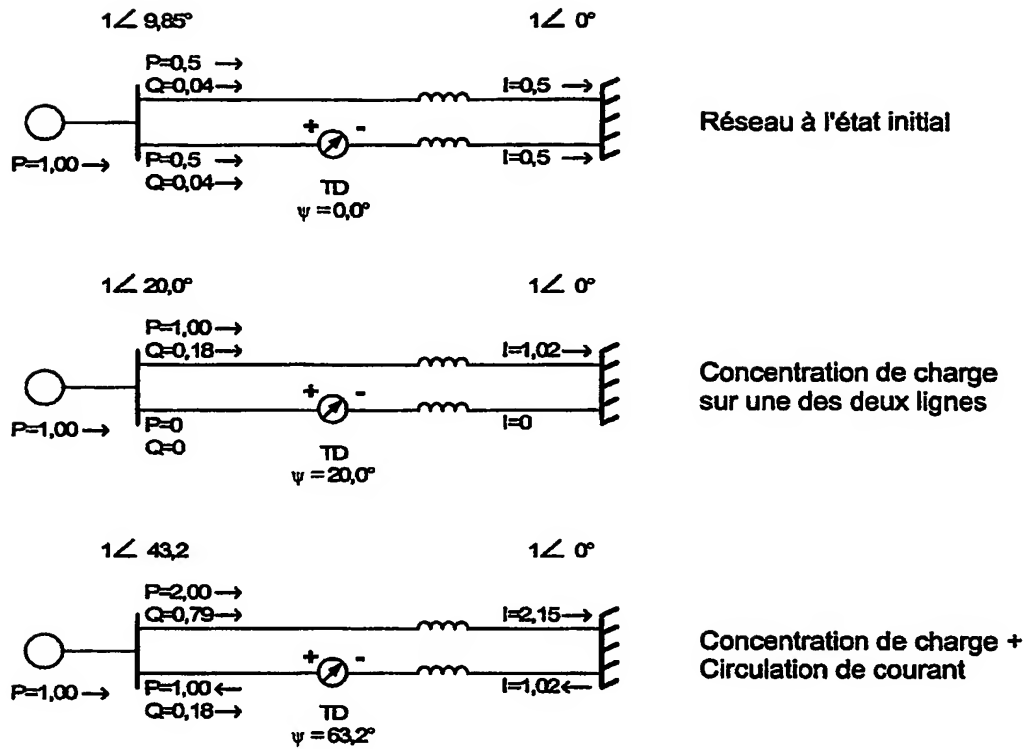


Fig. 1 L'effet du TD se traduit par la circulation d'un courant actif dans la boucle formée par les deux lignes.

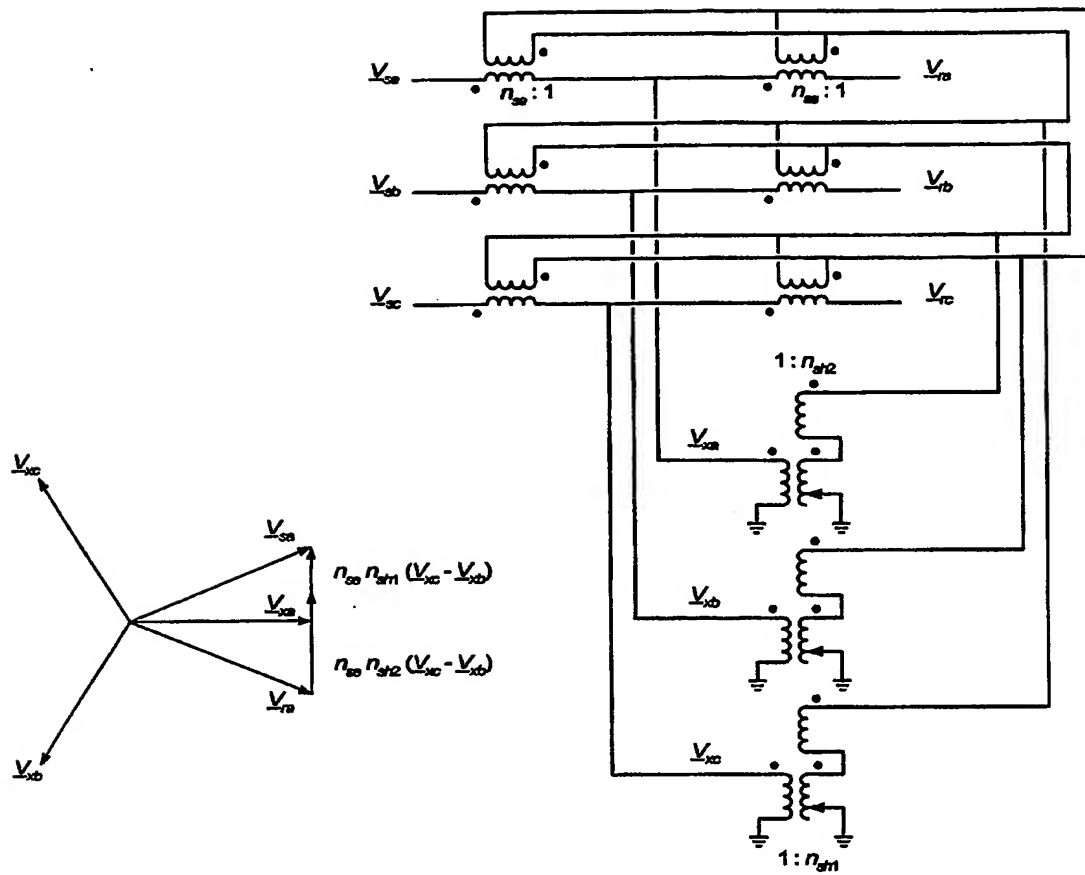
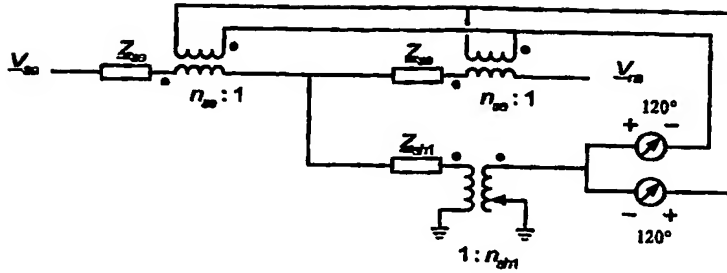
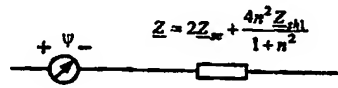


Fig. 2 Transformateur-déphaseur à deux noyaux (Mersereau).

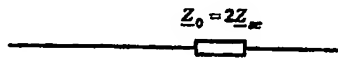
a) Schéma équivalent (séqu. directe)



b) Séquence directe (répartition de puis.)



c) Séquence homopolaire (court-circuit)



$$n = \sqrt{3} n_{sc} n_{sh} = -\tan\left(\frac{\psi}{2}\right)$$

Fig. 3 Schéma équivalent du TD lorsque la plage angulaire est centrée à 0°.

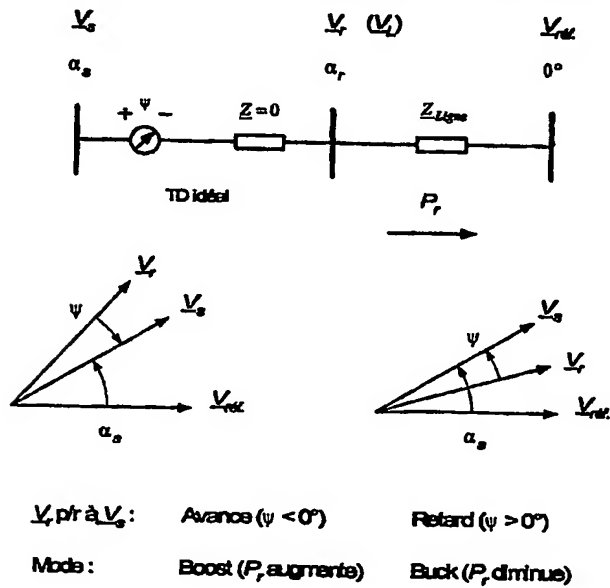


Fig. 4 Modes d'utilisation des TD et convention de signe.

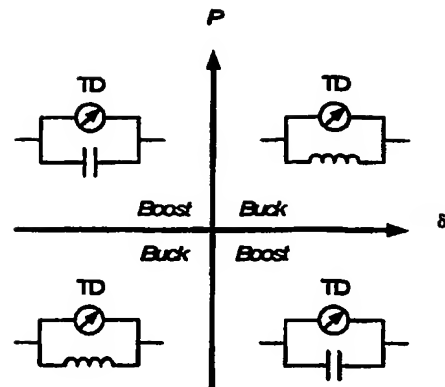


Fig. 5 Type de TDA à employer suivant son mode d'exploitation.

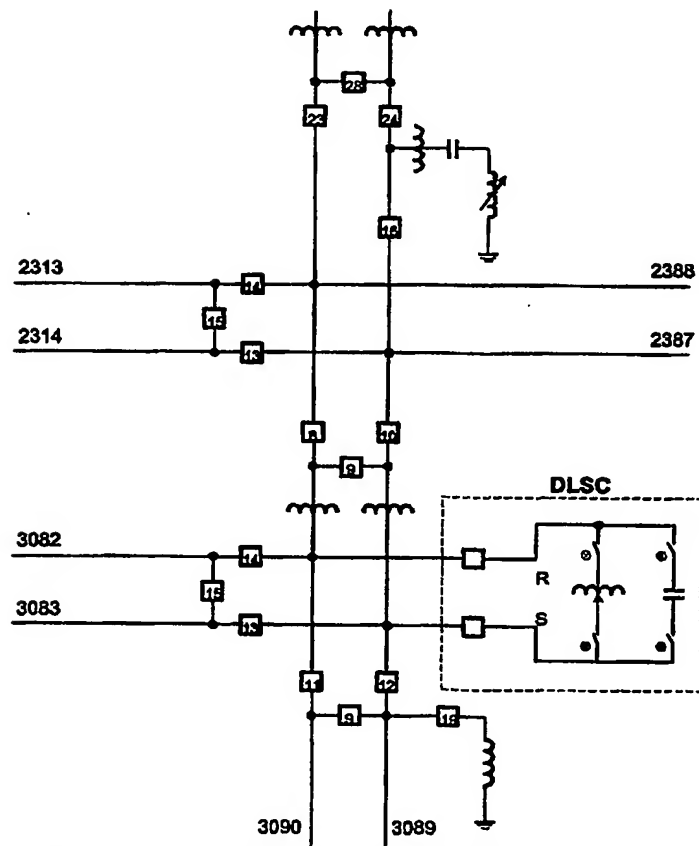


Fig. 6 Raccordement d'un DLSC au jeu de barres 315 kV du poste cible.

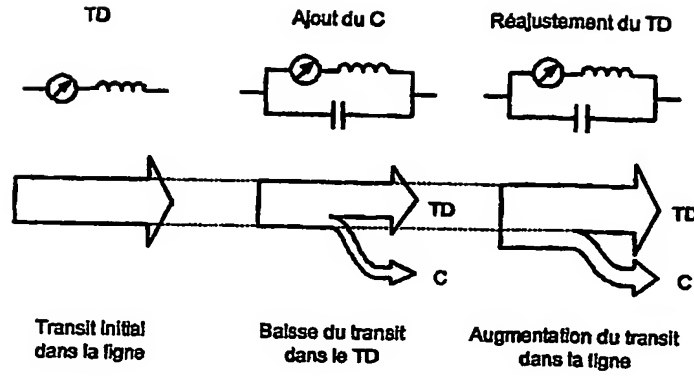


Fig. 7 Accroissement du transit par la conversion d'un TD en TDA.

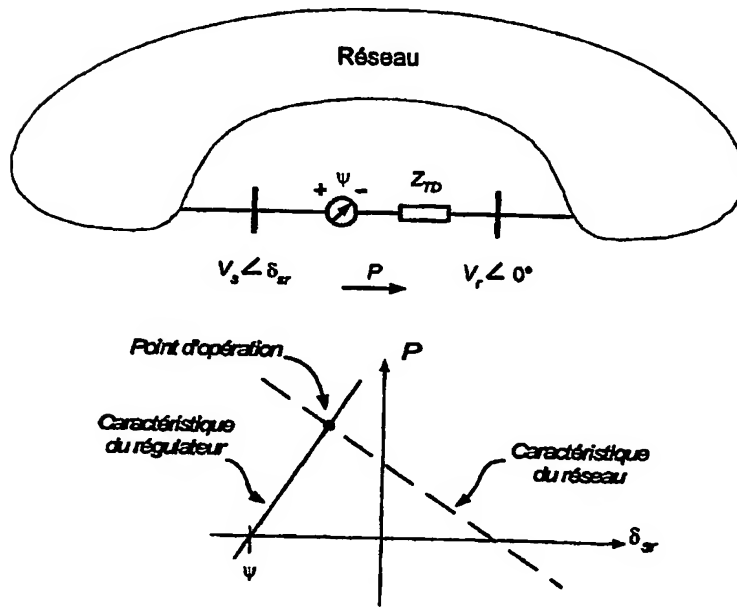


Fig. 8 Plan P-dsr.

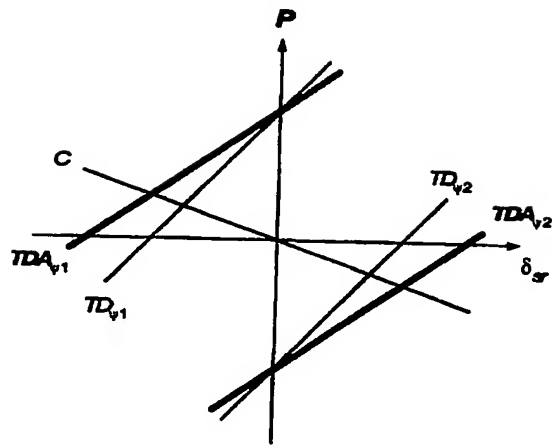


Fig. 9 Caractéristiques du TDA pour deux valeurs de angle interne  $\psi$  du TD.

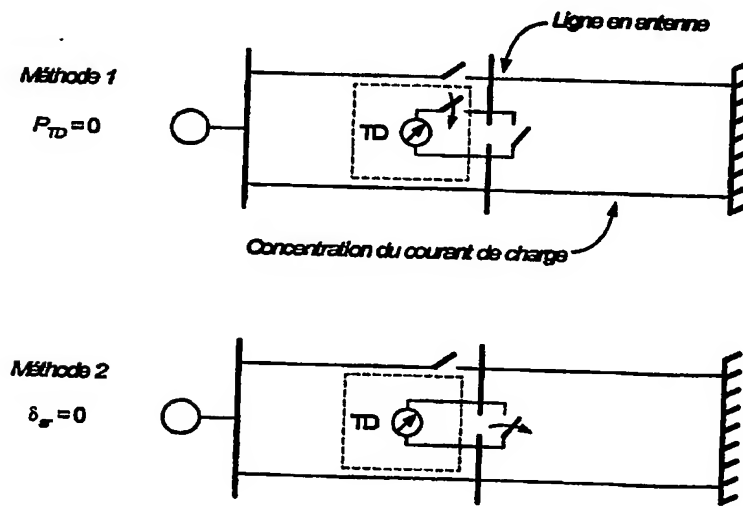


Fig. 10 Mise en service du TD suivant deux méthodes.

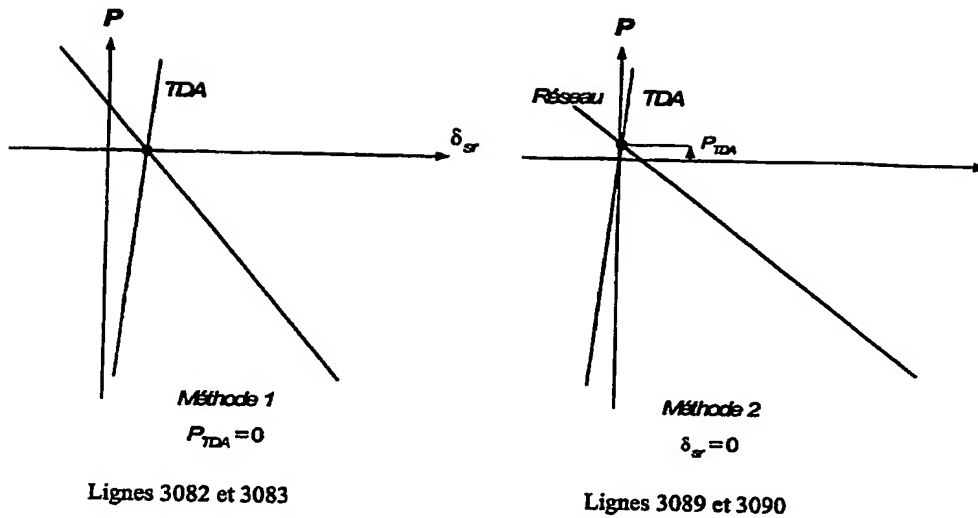


Fig. 11 Mise en service des lignes à 315 kV.

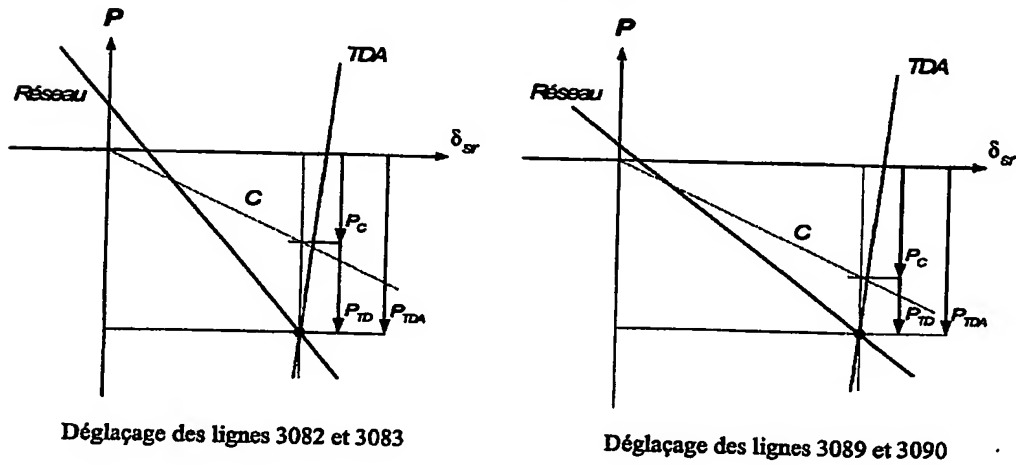
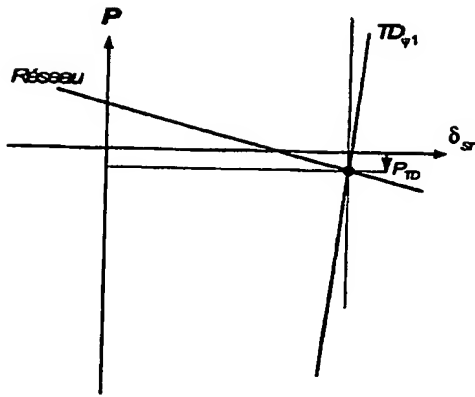
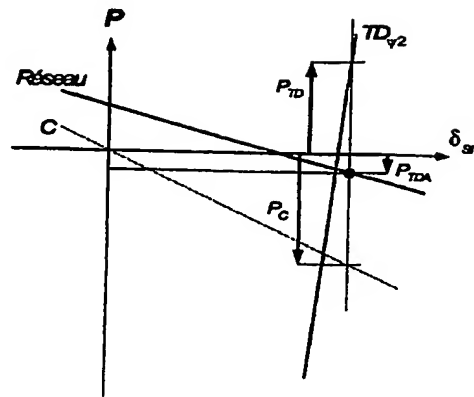


Fig. 12 Choix du condensateur du TDA.



Déglacement des lignes 2387 et 2388  
en mode TD



Déglacement des lignes 2387 et 2388  
en mode TDA

Fig. 13 Lorsque la pente réseau est faible (déglacement à 230 kV), le mode TD est préférable pour éviter l'apparition d'une boucle de courant entre le condensateur et le TD du TDA.



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☒ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**